

## サケの母川回帰行動解明のためのサケ自動追跡ロボット 船

A ROBOT BOAT FOLLOWING A SALMON FOR  
ELUCIDATING HOMING BEHAVIOR OF A SALMON鈴木 正清<sup>†</sup>和田雅昭<sup>‡</sup>烏野慶一<sup>+</sup>上田 宏<sup>\*</sup>Masakiyo Suzuki<sup>†</sup>Masaaki Wada<sup>‡</sup>Keiichi Karasuma<sup>+</sup>Hiroshi Ueda<sup>\*</sup><sup>†</sup> 北見工業大学 情報システム工学科

Department of Computer Science, Kitami Institute of Technology

Email: masakiyo@cs.kitami-it.ac.jp

<sup>‡</sup> 株式会社東和電機製作所

Towa Denki Seisakusho Co., Ltd.

<sup>+</sup> 北海道大学 大学院水産科学研究科 環境生物資源科学専攻

Division of Marine Environment and Resources,

Graduate School of Fisheries Science and Faculty of Fisheries,

Hokkaido University

<sup>\*</sup> 北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター

Field Science Center for Northern Biosphere,

Hokkaido University

あらまし

サケが、母川で孵化し、外洋で成長したのちに、産卵のために孵化した川に戻って来ることは良く知られており、この行動は母川回帰行動と呼ばれている。この行動を利用したサケの人工孵化は、水産資源の確保に役立っている。サケがなぜ母川回帰できるかについては、さまざまな説が提唱されているが、実証実験はなされていない。本報告では、洞爺湖内でサクラマスやヒメマスを対象に、母川回帰行動の実証実験のために、自動追尾システムを開発したので、その概要を報告する。

## 1. はじめに

サケが、母川で孵化し、外洋で成長したのちに、産卵のために孵化した川に戻って来ることは良く知られており、この行動は母川回帰行動と呼ばれている。この行動を利用したサケの人工孵化は、水産資源の確保に役立っている。

サケの母川回帰行動は、良く知られる事実であるにもかかわらず、謎に包まれている。外洋の広さと母川河口の狭さを比べれば、一旦広大な外洋に出て回遊

を開始したサケが、生まれた川を探し当てて戻ってくることは、ほとんど不可能に近いとさえ思える。

近年報告されたサケの持つ高感度な臭いセンサは、母川回帰行動の謎を解く鍵として、注目を集めた。この高感度なセンサは、河口付近で母川を識別するためには有効に機能すると考えられるが、母川から遠く離れた外洋においては、母川の水に含まれる成分が限りなく希釈され、また母川以外のからの水の成分も混じるので、極微量な母川の水に含まれる成分がそれが識別できるとは考えがたい。また、この母川回帰行動のメカニズムについては、臭いセンサの他に、地磁気、太陽光あるいは地形など情報を利用しているのではないかという説が提案されており、諸説が入り乱れているものの実証がなされていない。

これまでに、サケの母川回帰行動のメカニズム解明のための実証実験として、サケ科に属し、川と湖の間で母川回帰行動を示すサクラマスやヒメマスなどを対象に、追跡調査がなされてきた。この調査は、洞爺湖において、母川河口で遡上しようとしているサケを捕獲し、そのサケの一部の感覚器を不能にして放流し、その後の行動を追跡するものである。この追跡実験では、

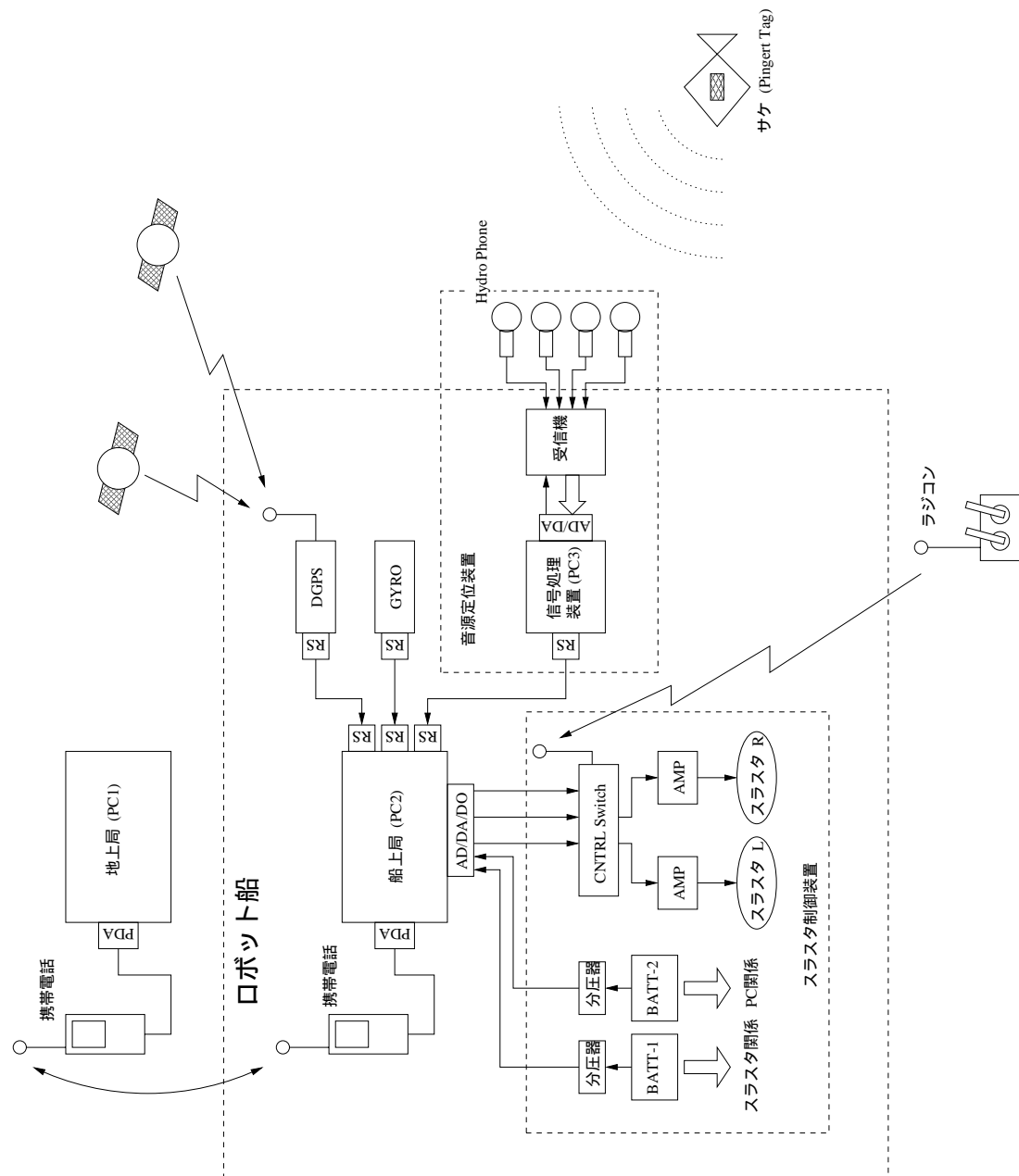


図 1: サケ自動追尾ロボット船の概要: 地上局は、一台のパソコン (PC1) と携帯電話からなり、ロボット船と携帯電話を介してデータ通信し、ロボット船から送信されるロボット船とピンガータグに関する情報を PC モニタ上に洞爺湖の地図 [1, 2] と併に表示する。この表示情報は、人がロボット船の動作状態とピンガータグを監視するために利用される。また地上局では、ロボット船が自ら運動動作を決定するために必要な運転モードとこれに付随する情報をロボット船に送信する。ロボット船は、バッテリー駆動の 2 機のモータを推進装置とする幅 1m, c 長さ 2m の双胴船であり、DGPS, 簡易 GYRO, 音源定位装置, スラスト制御装置および船上局を搭載する。DGPS は、ロボット船の位置と進行速度, 進行方位を観測し、そのデータを船上局に送信する。簡易 GYRO は、船体姿勢 (横揺れ, 縦揺れ, 船首方向) を観測し、そのデータを船上局に送信する。音源定位装置は、ロボット船を基準とするピンガータグの 3 次元相対位置を観測し、そのデータを船上局に送信する。スラスト制御装置は、スラスト制御のためのラジコン操縦モードとコンピュータ操縦モード, および操縦モード切り替え機能を持つ。ラジコン操縦モードでは、ラジコン受信機で受信される信号に従ってスラストを制御し、コンピュータ操縦モードでは、船上局コンピュータ (PC2) から出力されるスラスト制御電圧に従ってスラストを制御する。操縦モード切り替えは、手動切り替えスイッチ, あるいは船上局コンピュータ (PC2) から送信される操縦モード切替信号によって行う。また本装置は、バッテリー監視のための信号を PC2 に送る。船上局 (PC2) は、DGPS, 簡易 GYRO, 音源定位装置, スラスト制御装置, 地上局から信号を受信し、これらを統合しスラスト動作を決定して、スラスト制御装置に信号を送信する。また、統合された情報を地上局に送り返す。

サケにバースト波を発信する小型の超音波発信器を飲み込ませ、ボートに取り付けた垂直な回転軸を持つ指向性の鋭い受信機でバースト波を受信し、受信音を人間の可聴域に変調して人間がその音を確認し、発信器の方向を探索し、ボートを操作して、発信器を追跡する方法が採られてきた。

この方法では、超音波の発信源の探索、ボートの操作、さらに記録のために、それぞれ専任の人員が必要であり、最低3人の共同作業となる。また各役割を一人で連続して行う場合には、追跡時間に限界がある。すなわち、これまでの追尾実験は、労力と人件費の面で経済的でなく、また長時間の追跡は困難である。このために、人の手を介さずに自動的にサケを追跡するシステム、すなわちサケの自動追尾システムの開発が望まれている。

本研究では、洞爺湖内でサクラマスやヒメマスを追跡調査するための自動追尾システムを開発したので、その概要を報告する。

## 2. サケ自動追尾システムの概要

本システムは、洞爺湖内で産卵期のサケの母川回帰行動を調査するために、1匹のサケを1艘のロボット船で追跡するシステムである。サケ自動追尾システムの概要を図1に示す。本システムは、地上局とロボット船からなる。

洞爺湖において、母川に遡上するために河口に集まってきたサケを捕獲し、そのサケにバースト波を発信する小型の超音波発信器（ピンガータグ）を飲み込ませ、再び湖に放す。ロボット船に取り付けた4つのハイドロホーンからなる超音波センサで信号を受信し、信号処理してロボット船から見たピンガータグの相対位置を求め、ロボット船にピンガータグを追跡させる。ロボット船とピンガータグの状態は、地上局でモニターする。また地上局は、ロボット船にロボット船の運転モードを指示する。

地上局から指定されるロボット船の運転モードとロボット船の動作は以下の通りである。

ラジコンモード：ラジコン操縦装置に従って運転する。

リモコンモード：地上局（PC1）で指定した推進力と旋回力に従って運転する。

自航モード：地上局（PC1）で指定した目標位置まで自動航行する。

寄港モード：洞爺湖実験所の船庫付近の指定位置を目標位置とした自航モードである。

表 1: RS232C ポートの設定

	DGPS	GYRO	音源定位
baud rate	4800 bps	9600 bps	9600 bps
character size	8 bit	8 bit	8 bit
stop bit	1 bit	1 bit	1 bit
parity	none	none	none
flow control	hardware	hardware	hardware

追尾モード：ピンガータグの位置を目標位置とした自航モードである。

保持モード：現在位置を目標位置とした自航モードである。

停止モード：ロボット船は、スラスタを停止し漂流する。

上記の運転モードの内、ラジコンモード以外は、コンピュータ制御モードとして分類する。

ここで、自動航行とは目標位置まで航行し、目標位置付近で定点保持することを表すものとする。目標位置までの航行は、危険回避のためのモードの指定により、危険回避せず直進する（直進モード）、緊急停止する（緊急停止モード）、回避経路を探す（探索モード）に分けられる。

## 3. 船上局

船上局は、DGPS、簡易 GYRO および音源定位装置から得られるロボット船とピンガータグの情報に基づいて、地上局から指定されるロボット船の運転モードに従って、スラスタ動作を決定し、スラスタ制御装置に信号を送信する。また船上局は、これらのデータとバッテリー電圧を地上局に送信する。

地上局と船上局との通信は、携帯電話を介した IP 接続であり、船上局を PPP 接続のサーバとし、地上局からの呼び出しに従って通信路を開く。

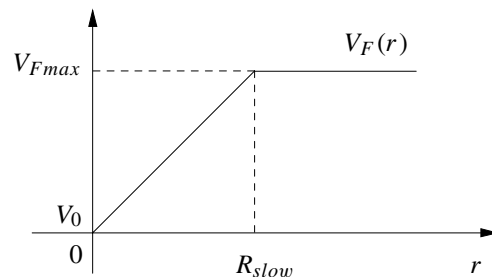
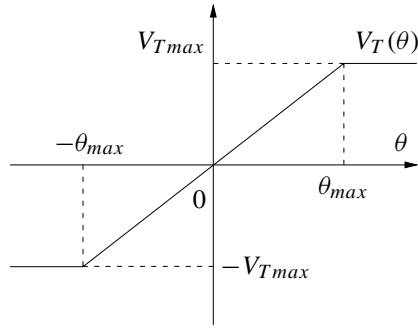
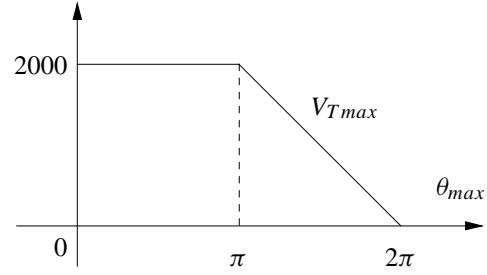


図 2: 目標距離  $r$  による前進推力  $V_F(r)$  の決定



(a) 目標方位  $\theta$  による右旋回推力  $V_T(\theta)$  の決定



(b) 全力旋回角  $\theta_{max}$  による全力旋回推力  $V_{Tmax}$  の決定

図 3: 右旋回推力の決定

船上局パソコン (PC2) と DGPS, 簡易ジャイロ, 音源定位装置との間は, RS232C ストレートケーブルを介して通信する, 各装置の RS232C ポートの設定を表 1 に示す.

船上局パソコン (PC2) とスラスト制御装置との間は, AD 8 チャンネル, DA 2 チャンネル, TTL レベルのデジタル入力 (DI) 4 ポートおよび出力 (DO) 4 ポートを有する IO カードを介してデータ通信する. AD チャンネルは, バッテリ監視のために用い, DA チャンネルは, スラスト制御のために用いる. また DO ポートは, スラスト制御について, ラジコンモードとコンピュータ制御モードとの切り替えのために用いる.

### 3.1. 航行状態におけるスラスト制御信号の決定

船上局が自らスラスト制御信号を決定するのは, 自航モード, 寄港モード, 追尾モード, 保持モードにおいて, ロボット船が航行状態にあるときのみである. このとき船上局は, ロボット船と目標との相対位置に従って左右のスラスト制御信号を定める.

スラスト制御信号を定める考え方は以下の通りである. 左右のスラスト制御信号をそれぞれ  $V_L, V_R$  とする. これらは  $0 \sim 4000$  [mV] の範囲の値をとり,  $0$  [mV] で最大後進,  $2000$  [mV] で停止,  $4000$  [mV] で最大前進の推力となる.

ロボット船の前進推力 (あるいは単に推進力) を  $V_F$ , 右旋回推力 (あるいは単に旋回力) を  $V_T$  で表す. ロボット船を後進させることはないとし,  $V_F = 0$  は停止,  $V_F = 2000$  は最大前進とする.  $V_T = -2000$  は最大左回転,  $V_T = 2000$  は最大右回転に対応づける.

ロボット船から目標位置までの距離  $r$  によって,  $V_F$  を決定し, 船首方向に対する目標方向のずれ  $\theta$  によって,  $V_T$  を決定する.

ロボット船が減速を開始する半径 (減速半径) を  $R_{slow}$  とし,  $V_F$  を図 2 のように定める. ここに, 最大推進力  $V_{Fmax} = 2000$  とする.

旋回力  $V_T$  は, 全力旋回角を  $\theta_{max}$  とし,  $V_T$  を図 3 (a) のように定める.  $V_{Tmax}$  は, 方位のずれが全力旋回角以上であるときの旋回力であり, 図 3 (b) で与える.  $\theta_{max}$  を  $\pi$  以上に指定すると旋回力が弱まるようにしている.

左右のスラスト制御信号  $V_L, V_R$  は,  $V_F(r)$  と  $V_T(\theta)$  を用い次式で与える.

$$V_L = V_F(r) + V_T(\theta) + 2000 \quad (1)$$

$$V_R = V_F(r) - V_T(\theta) + 2000 \quad (2)$$

$$V_m = \max\{V_L, V_R\} \quad (3)$$

$$V_0 = \begin{cases} 0 & (V_m < 4000) \\ V_m - 4000 & (V_m \geq 4000) \end{cases} \quad (4)$$

$$V_L = V_L - V_0 \quad (5)$$

$$V_R = V_R - V_0 \quad (6)$$

$V_L, V_R$  は  $0 \sim 4000$  の範囲に制限されているので,  $V_L, V_R$  がこの範囲を超えときには,  $V_0$  によって推進力を犠牲にしている.

## 4. 地上局

地上局モニタでは船上局から送られてくるロボット船とピンがータグ, スラスト制御電圧, バッテリに関するすべての情報を表示し, また, ロボット船の運転モードを画面上でしてする. 地上局モニタの表示画面を図 4 に示す.

## 5. 音源定位装置

音源定位装置は, 4 つの無指向性ハイドロホン, 受

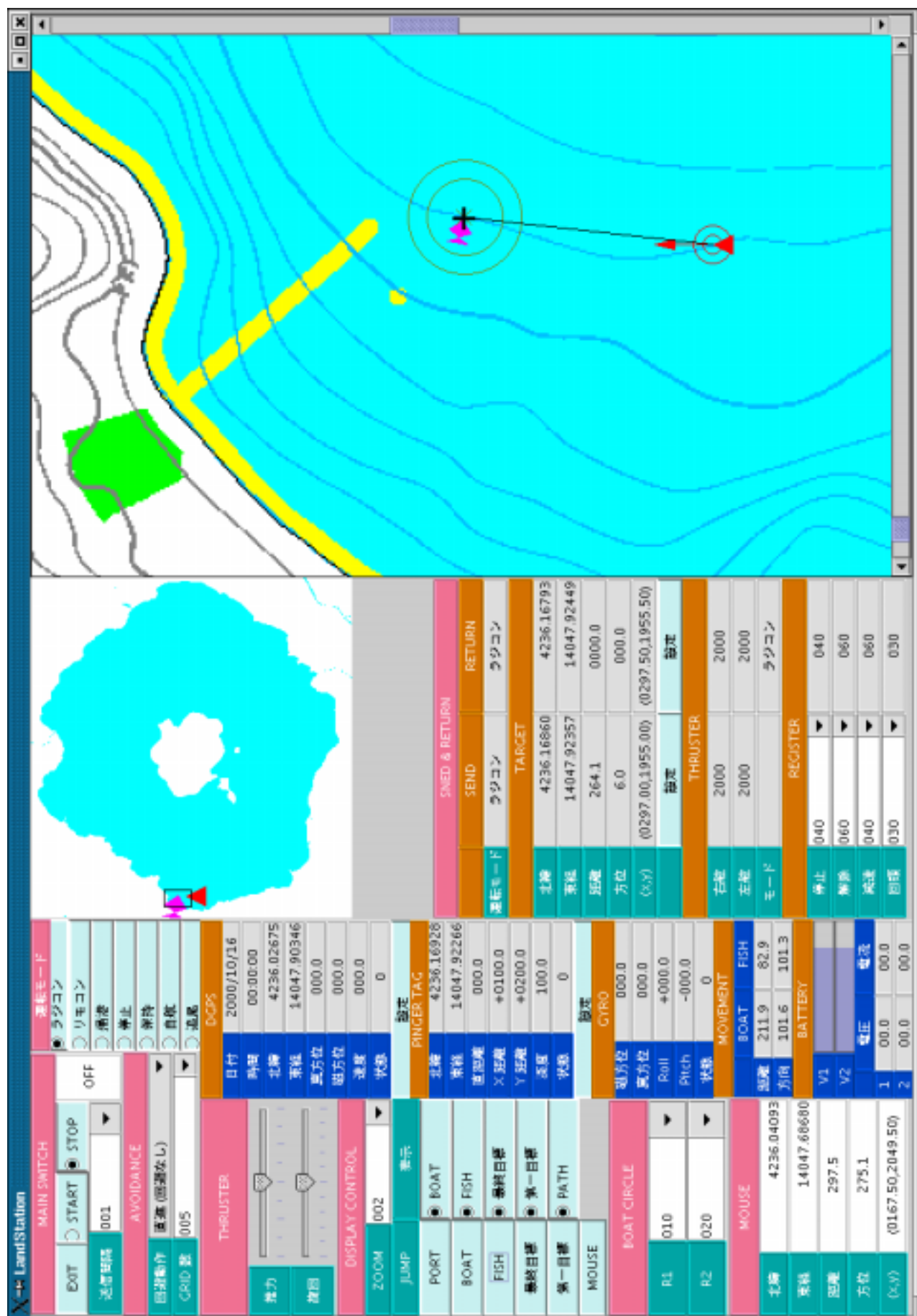


図 4: 地上局モニタ

信機，信号処理装置 (PC3) から構成される．4 つのハイドロホーンでピンガータグの発信する超音波バースト波を受信する．受信機は，この4 つの受信信号を増幅・整流・平滑化し，その結果を信号処理装置 (PC3) に送る．信号処理装置では，受信機から送られる信号をサンプリングし，バースト波の検出，バースト波信号レベル調整のためのゲインコントロール電圧の算出，音源方位推定を行う．また，ゲインコントロール信号とバースト波の信号レベルからピンガータグまでの距離を推定する．ゲインコントロール信号は，DA 変換を用いて受信機に送られ，ピンガータグの位置情報は船上局に送信される．

ピンガータグ は，5ms の幅の4 つのバースト波を 20ms, 45ms, 85ms のインターバルにおいて 5s 周期で発信する．バースト波の中心周波数は 67.8kHz である．

ハイドロホーン は，直径 3cm の球形の無指向性超音波センサである．4 つのハイドロホーンは，水平平面内の 1m 四方の正方形の頂点を基準とし，一つの対角線上のセンサは深さを変えず，もう一方の対角線上のセンサは下方に 10cm 移動した位置に配置する．

受信機 は，プリアンプ，0～80dB のゲインコントロールアンプ，バンドパスフィルタ，RMS，DC アンプが縦続に接続されており，ハイドロホーンで受信される信号をアナログ処理して，信号処理装置に送る．ゲインコントロールアンプは，0V のゲインコントロール信号で 80dB のゲイン，2.5V で 0dB のゲインを与える．ゲインコントロール信号に対して，ゲインは直線的に変化する．受信機のゲインコントロール信号は，信号処理装置から指定される．また，ゲインコントロールの監視のために，ゲインコントロール信号の 2.560 倍の信号を信号処理装置に送る．

信号処理装置 は，アナログ処理された4 つのハイドロホーンの信号とゲインコントロール信号の 2.560 倍の信号を受信機から受け取る．これらの5 チャネルアナログ信号は，PCMCIA IO カード (AD12-8(PM), Contec 製) の AD 変換器を介してサンプリングされ，パソコンに取り込まれる．5 チャネルの信号は，チャンネル間間隔 8.5  $\mu$ s でサンプリングされ，AD 変換器内部のバッファに格納されたのち，パソコン PC3 により読み出される．サンプリング周期は 42.5  $\mu$ s である．信号処理装置

は，サンプリングされた信号を 6s 間のバッファに格納し，これを一括処理する．

### 5.1. バースト波検出

信号処理装置が受け取るアナログ処理されたピンガータグの信号は，ピンガータグ発信信号の正の包絡に相当する．ピンガータグ発信信号の正の包絡は，パルス幅 5ms の4 つのパルスの列であり，これを参照信号とする．信号処理装置に格納された 6s 間のバッファ内の信号に対して，サンプリングタイミングのずれを無視して，4 つのチャンネルの信号の平均を取って時系列 (平均信号と称する) を作り，これと参照信号の相互相関関数を計算する．相互相関関数が最大になる時刻をピンガータグ信号の受信時刻と見なす．

### 5.2. ゲイン制御

バースト波検出で得られる平均信号の最大値は，受信パルス列におけるパルス信号レベルの平均値の定数倍を表す．受信パルス列におけるパルス信号レベルの平均値を  $V_{ave}$  で表し，信号受信時のゲインコントロール電圧を  $V_g$  で表す． $V_{ave}$  が一定値  $V_d$  になるように，次式に従い  $V_g$  を更新する．

$$\Delta V_g = \alpha \cdot 20 \log_{10} \frac{V_d}{V_{ave}} \quad (7)$$

$$\alpha = 0.5 \quad (8)$$

$$V_g \leftarrow V_g + \Delta V_g \quad (9)$$

$\alpha$  はゲインの変動を押さえるために 1 未満の値を設定する． $V_d$  は 2V 程度とする．

### 5.3. 各センサでの受信時刻と距離推定

アナログ処理され，A/D 変換された4 チャネルの各信号と参照信号との相互相関関数を計算し，各相互相関関数について，最大値  $V_i$  と最大値を与える時刻  $t_i$ ， $i = 1, 2, 3, 4$  を求める．

$V_i$  の最大値を  $V_M$  とする． $V_M$  と更新前のゲインコントロール電圧  $V_g$  を用いて，ハイドロホーンからピンガータグまでの距離  $r$  を推定する．距離の推定は，受信信号 (音圧レベル) は距離に反比例することに基づく．

$$G = 80(1 - V_g/2.5) \quad (10)$$

$$A = 10^{\frac{G}{20}} \quad (11)$$

$$r = r_0 \frac{V_0 A}{V_M} \quad (12)$$

ここに  $G$  はゲイン [dB] であり,  $A$  は増幅率,  $V_0$  はハイドロホーンから  $r_0$  [m] にピンガータグがあり, ゲインが 0dB のときの信号レベルを表す.  $r_0 = 1$  とし  $V_0$  は実験によって定める.

#### 5.4. 方位推定

各ハイドロホーンにおけるバースト波受信時刻のずれに基づいて, ピンガータグの方位を推定する.

##### 5.4.1. 3次元センサレイの観測モデル

船首方向を  $x$  軸, 右舷方向を  $y$  軸, 下方方向を  $z$  とするロボット船を基準とする移動直交座標系  $(x, y, z)$  によってハイドロホーン的位置を表現する. またバースト波の入射方位を次の  $(\theta, \phi)$  で表す.

- $\mathbf{r}_i = [x_i \ y_i \ z_i]$   
ハイドロホーン  $i$  の位置ベクトル  
( $i = 1, 2, 3, 4$ )
- $\theta$  : バースト波入射方位  
( $x$  軸を基準とする水平方位角)
- $\phi$  : バースト波入射方位 (下方仰角)
- $d_{i,j}$  : ハイドロホーン  $j$  を基準とした  
ハイドロホーン  $i$  での受信遅延
- $v$  : 水中での音速

受信遅延は, 次式で表される.

$$d_{i,j} = \frac{1}{v}(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{a}(\theta, \phi) \quad (13)$$

ここに,

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \end{bmatrix} \quad (14)$$

行列表現すれば,

$$\mathbf{d} = \mathbf{R}\mathbf{a} \quad (15)$$

ここに,

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_{2,1} \\ d_{3,1} \\ d_{4,1} \\ d_{3,2} \\ d_{4,2} \\ d_{4,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \\ d_6 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_4 - \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{r}_4 - \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{r}_4 - \mathbf{r}_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

##### 5.4.2. 方位推定

ハイドロホーン間の遅延時間の観測値を次式でモデル化する.

$$\mathbf{d} = \mathbf{R}\mathbf{a} + \mathbf{n} \quad (17)$$

ここに  $\mathbf{n}$  は, 観測雑音である. 観測データ  $d_i, i = 1, 2, \dots, N$  に対して適当な  $\mathbf{a}$  の推定値が得られれば, 信号の入射方位は次式によって求められる.

$$\begin{aligned} \hat{\theta} &= \tan^{-1} \frac{a_2}{a_1} \\ \hat{\phi} &= \tan^{-1} \frac{a_3}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2}} \end{aligned} \quad (18)$$

ここに,

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

従って, 方位推定は  $\mathbf{a}$  を推定する問題となる.

##### 5.4.3. 拘束条件なし最小二乗誤差推定

遅延時間ベクトルの観測データ  $d_i, i = 1, 2, \dots, N$  に対して, 誤差ベクトルを

$$\mathbf{e}_i = d_i - \mathbf{R}\mathbf{a} \quad (20)$$

で定義し, 二乗誤差を次式で定義する.

$$E = \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_i \quad (21)$$

$$= N\{\bar{\mathbf{D}} - \bar{\mathbf{d}}^T \mathbf{R}\mathbf{a} - \mathbf{a}^T \mathbf{R}^T \bar{\mathbf{d}} + \mathbf{a}^T \mathbf{R}^T \mathbf{R}\mathbf{a}\} \quad (22)$$

ここに

$$\bar{\mathbf{d}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad \bar{\mathbf{D}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^T d_i \quad (23)$$

$E$  を最小にする  $\mathbf{a}$  の推定値は次式で与えられる.

$$\tilde{\mathbf{a}} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \bar{\mathbf{d}} \quad (24)$$

$\mathbf{a}$  は,

$$\mathbf{a}^T \mathbf{a} = 1 \quad (25)$$

を満たすが,  $\tilde{\mathbf{a}}$  はこの条件を満たすとは限らないので,  $\tilde{\mathbf{a}}/\|\tilde{\mathbf{a}}\|$  を  $\mathbf{a}$  の推定値とすれば, 推定方位は, 式 (18) で与えられる.

#### 5.4.4. 拘束条件付き最小二乗誤差推定

式 (25) の条件の下に，二乗誤差  $E$  を最小にする  $a$  は，Lagrange の未定係数を  $\alpha$  として，次の評価関数を最小にする  $a$  として求められる．

$$J = E - N\alpha(a^T a - 1) \quad (26)$$

式 (26) を  $a$  で偏微分すれば，次式が得られる．

$$(R^T R - \alpha I) a = R^T \bar{d} \quad (27)$$

$R^T R$  を固有値分解し，

$$R^T R = V \Lambda V^T \quad (28)$$

$$= V \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} V^T \quad (29)$$

と表せば，式 (27) は次式で表される．

$$(\Lambda - \alpha I) b = c \quad (30)$$

$$a = V b \quad (31)$$

$$c = V^T R^T \bar{d} \quad (32)$$

すなわち，解くべき方程式は

$$(\lambda_1 - \alpha) b_1 = c_1 \quad (33)$$

$$(\lambda_2 - \alpha) b_2 = c_2 \quad (34)$$

$$(\lambda_3 - \alpha) b_3 = c_3 \quad (35)$$

と表され，式 (25) の条件は式で与えられる．

$$(\lambda_1 - \alpha)^2 + (\lambda_2 - \alpha)^2 + (\lambda_3 - \alpha)^2 = c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 \quad (36)$$

式 (36) は  $\alpha$  に関する 6 次方程式である．式 (26) の評価関数  $J$  は， $\alpha$  が実数の時のみ意味を持つので，式 (36) の実根に対して，式 (33), (34), (35) を解き，式 (31) を用いれば  $a$  の候補が得られる．各実数根  $\alpha$  に対して， $a$  の候補を求め，それらのうち評価関数  $J$  を最小にするものが解となる．

ところで  $\lambda_1 - \alpha = 0$ ,  $c_1 \neq 0$  のとき， $\alpha$  に対応する解の候補はなしとなる． $\lambda_1 - \alpha = 0$ ,  $c_1 = 0$  ならば， $b_1$  は不定となる．このときもし， $b_2, b_3$  が不定でなく， $\sqrt{b_2^2 + b_3^2} \leq 1$  ならば， $b_1 = \pm \sqrt{1 - (b_2^2 + b_3^2)}$  で与えられる 2 つの  $b$  が解の候補となる．

本システムにおけるハイドロホーンの配置では， $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  は全て異なる値を持つので， $b$  の 2 つ以上の要素が不定に成ることはない．

## 6. むすび

本報告書では，ロボット船と地上局から成るサケ自動追尾システムの概要を示した．ロボット船における船上局で行うロボット船の制御方法，構成と地上局におけるモニタプログラム，ロボット船上における音源方位推定装置の構成と音源方位推定法を示した．

## 謝辞

音源定位装置における受信機を製作していただいた鎌田清春氏に深く感謝いたします．また，本研究は科学研究補助金，基盤研究 (B) (2) 展開，研究課題番号 11556035 の補助を受けた．

## REFERENCES

- [1] 国土地理院ホームページ,  
“<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/coordinates/localtrans.html>.”
- [2] 国土地理院, “数値地図 25000 (地図画像) 室蘭 CD-ROM 版,” 日本地図センター, 1998.